Otto Mayr

# La régulation des machines par rétroaction

Octobre 1970

*L'histoire du concept de rétroaction peut être retracée en suivant l'évolution de trois mécanismes : les clepsydres, les thermostats et les moulins à vent.*

Chaque animal représente un mécanisme autorégulé qui doit sa survie, sa posture et la plupart de ses comportements à une juxtaposition de systèmes biologiques rétroactifs. Face à l'universalité de ce processus et à l'existence de mécanismes de rétroaction dans une infinie diversité de phénomènes, des cycles démographiques dans les populations de prédateurs aux variations des cours de la bourse, on comprend mal pourquoi l'étude théorique du concept de régulation par rétroaction est intervenue si tard dans l'histoire des sciences et des techniques. Le terme « rétroaction » lui-même est une création récente des pionniers de la radiodiffusion, au début du XX$^{e}$ siècle. L'exploration des implications théoriques de ce principe est encore plus récente puisque l'impulsion principale fut donnée dans les années 1940 par Norbert Wiener et ses collaborateurs.

La régulation par rétroaction est un exemple de technique précédant la théorie. La rétroaction a été appliquée pour la première fois sur des machines et des instruments de mesure simples, ayant pour certains plus de 2000 ans. Le thermostat et le régulateur à boules (dit de Watt) sont des exemples modernes universellement connus. Bien que les antiques dispositifs du début aient connu ensuite un haut degré de perfectionnement et de sophistication, le concept abstrait de régulation par rétroaction ne fit guère l'objet d'attention jusqu'aux années 1930. À cette époque, certains biologistes et quelques économistes établirent des parallèles frappants entre leurs propres sujets d'étude et les

mécanismes de régulation par rétroaction utilisés par les ingénieurs. Certains processus de régulation des organismes vivants et des comportements économiques présentaient les mêmes structures cycliques « de cause à effet » et obéissaient, apparemment, aux mêmes lois. Le concept de régulation par rétroaction s'imposait à l'évidence comme un outil puissant et polymorphe permettant d'analyser diverses formes de comportement dynamique. Aujourd'hui, le principe de la régulation par rétroaction n'est pas seulement une technique répandue dans le monde industriel, mais c'est aussi un mode de raisonnement, considéré par les scientifiques comme un important concept unificateur.

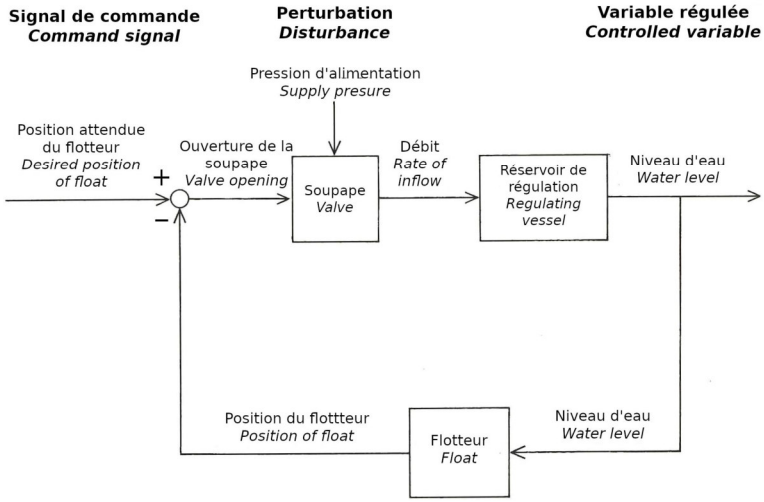
Nous allons tenter de décrire dans les lignes qui suivent l'histoire du concept de rétroaction. On peut retracer ce cheminement avec précision car la régulation par rétroaction se définit de façon rigoureuse. Wiener la décrit comme « une méthode d'intervention destinée à réguler un système en y réintégrant, comme variables d'action, les résultats de l'action antérieure de ce système ». Pour de nombreux électroniciens et informaticiens, la définition de ce concept est encore plus formelle :

> « Un système de régulation par rétroaction est un système de régulation qui tend à maintenir une relation donnée entre deux variables d'un système en comparant des fonctions de ces variables et en utilisant leur différence comme moyen de régulation. »

Le but d'un tel système est d'effectuer automatiquement une commande ; ce système fonctionne en maintenant la variable régulée (le signal de sortie) au même niveau que la variable de commande (le signal d'entrée) en dépit des variations dues à des perturbations imprévisibles. Le signal de commande peut être constant (indication de température d'un thermostat par exemple) ou variable (telle la position du volant dans le système de direction assistée d'une automobile). Dans tous les cas, pour qu'un système de régulation par rétroaction fonctionne efficacement, il faut que la variable régulée réagisse au signal de commande avec la plus extrême fidélité.

La caractéristique principale d'un système de régulation par rétroaction est sa structure en boucle fermée. L'état du signal de sortie est surveillé par un dispositif de détection qui mesure et renvoie ce signal vers l'entrée du système où il est soustrait au signal

de commande. Si le résultat de l'opération n'est pas nul, le système déclenche une action correctrice dont l'intensité et le sens dépendent de la valeur de la déviation, ou « signal d'erreur ». Dans le cas d'un thermostat d'ambiance, par exemple, quand la température de la pièce tombe au-dessous du seuil de température souhaité, le système répond par une augmentation du chauffage, c'est-à-dire qu'une variation négative du signal de sortie entraîne une action correctrice positive. En général, un signal qui parcourt la boucle d'un système de rétroaction change de signe durant la phase retour. Ce changement de signe est essentiel pour garantir la stabilité du système. En effet, si le signe du signal ne s'inversait pas, on créerait artificiellement une perturbation qui éloignerait de plus en plus le signal de sortie de l'optimum désiré : un vrai cercle vicieux !



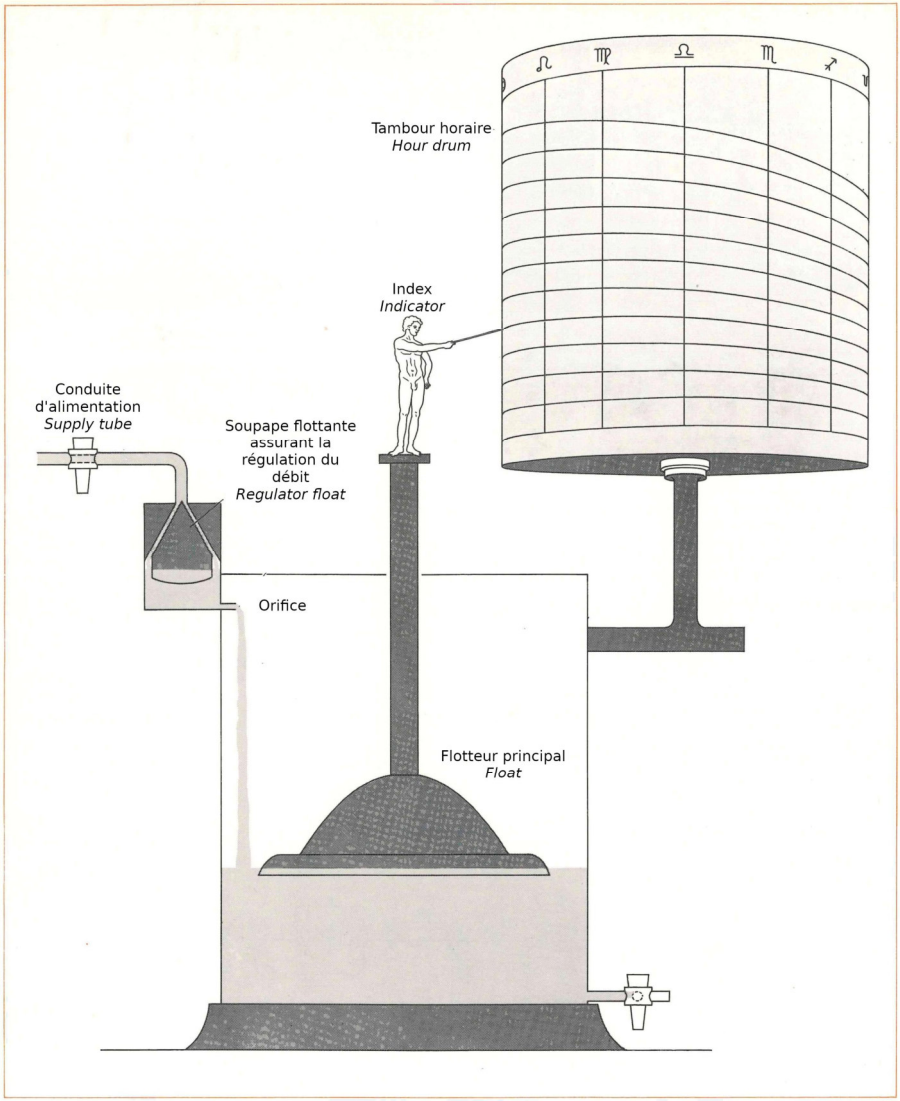

**1. UNE BOUCLE DE RÉTROACTION** classique est figurée sur ce diagramme simplifié qui montre le fonctionnement du régulateur de débit de la clepsydre de Ktesibios. Les flèches représentent les signaux et les cartouches les composants physiques sur lesquels ces signaux agissent. En représentant les signaux par des variables mathématiques et les composants par des fonctions, on parvient à réduire le diagramme à une équation différentielle décrivant le comportement dynamique du système.

L'origine et les principales étapes de développement du concept de rétroaction apparaissent clairement à travers l'histoire de trois mécanismes : les clepsydres, les thermostats et les systèmes de régulation des moulins à vent. Retraçons l'histoire de chacune de ces applications et voyons où elles nous ont menés.

## Les horloges à eau

Le plus ancien système régulé par rétroaction est une clepsydre (ou horloge à eau) inventée au III$^{e}$ siècle avant J.-C. par un mécanicien grec du nom de Ktesibios, qui travaillait au service du roi d'Alexandrie, Ptolémée II. Ktesibios était probablement en relation avec l'illustre musée d'Alexandrie, qui était alors le principal centre culturel du monde méditerranéen et qui attirait vers lui les plus grands savants de Grèce. On a perdu les descriptions de Ktesibios concernant ses inventions (outre la clepsydre, il est l'auteur d'une pompe refoulante, d'un orgue à eau et de plusieurs catapultes), mais on en conserve heureusement une trace dans l'ouvrage *De Architectura,* écrit par l'architecte et ingénieur romain Vitruve.

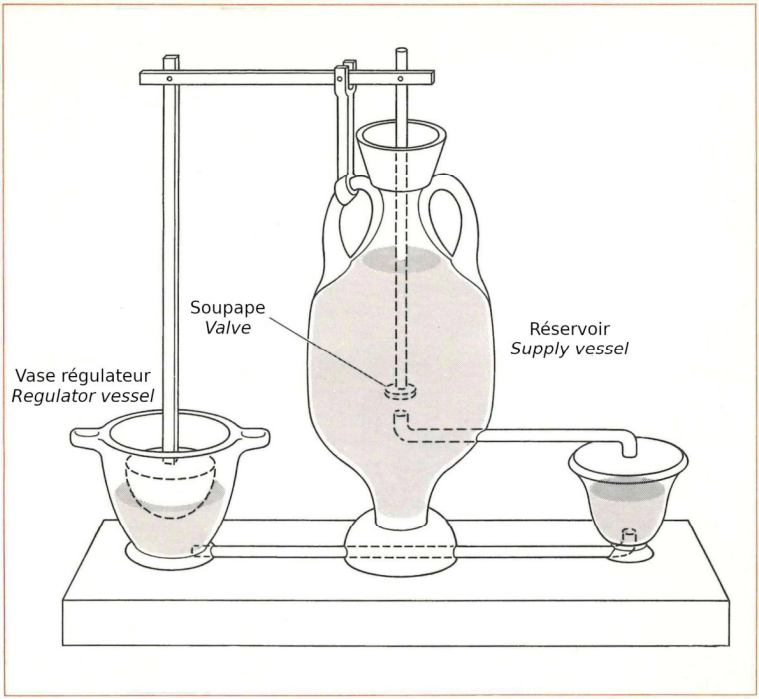
La description de la clepsydre de Ktesibios faite par Vitruve n'est pas claire. L'archéologue allemand Hermann Diels est néanmoins parvenu à la reconstituer de façon plausible. Dans une clepsydre, on mesure l'écoulement du temps à l'aide d'un petit filet d'eau qui s'écoule à débit constant dans un réservoir où la position d'un flotteur marque le temps qui passe (**figure 2**). Pour maintenir le débit constant, Ktesibios a inventé un dispositif ressemblant au carburateur des automobiles. Ce dispositif, intercalé entre le tuyau d'alimentation et le récipient à remplir, règle le débit d'eau au moyen d'une soupape flottante. Quand le flotteur de la soupape occupe une position adéquate, le pointeau qui lui est relié s'ouvre juste assez pour laisser couler un filet d'eau ayant le débit voulu dans le récipient dont le niveau indique le temps écoulé. Si pour une raison quelconque, le niveau d'eau dans le vase régulateur contenant la soupape flottante baisse ou monte au-dessus du niveau adéquat, le mouvement de la soupape provoque l'ouverture ou la fermeture de l'arrivée d'eau jusqu'au moment où le flotteur retrouve le niveau initial correct.




**2. LA CLEPSYDRE** est le plus ancien dispositif à rétroaction. Il fut inventé à Alexandrie au III[e] siècle avant J.-C. par un mécanicien grec nommé Ktesibios. Ce dessin est inspiré d'une reconstitution de la clepsydre de Ktesibios réalisée par l'archéologue allemand Hermann Diels. La statue tenant l'index est placée sur un gros flotteur (*en bas*) qui monte dans le réservoir au fur et à mesure que l'eau s'écoule lentement par l'orifice

supérieur. À l'époque, chaque période diurne était divisée en douze heures dont la durée changeait en fonction de la saison (les heures d'été étaient plus longues que les heures d'hiver). Ce découpage du temps explique le tracé des graduations sur le tambour horaire (*en haut à droite*).
Pour faire varier la longueur des heures, il suffisait de tourner le tambour. La soupape flottante (*en haut à gauche*) contrôle le débit d'eau arrivant dans le réservoir principal de la clepsydre. Pour que l'ensemble du dispositif fonctionne correctement, le niveau d'eau dans le réservoir de régulation doit rester constant. Si le niveau monte (en raison d'une surpression dans l'arrivée d'eau par exemple), la soupape monte et coupe l'arrivée d'eau. Dans le cas contraire, la pointe mobile descend et l'eau pénètre plus abondamment dans le réservoir de régulation. Ce dispositif est comparable à la vis pointeau de l'injecteur qui règle l'admission d'essence dans les carburateurs automobiles.

Trois siècles après Ktesibios, Héron d'Alexandrie décrit dans son ouvrage *Pneumatica,* plusieurs types de régulateurs à flotteur. Héron d'Alexandrie était l'auteur de nombreux traités sur les mathématiques, la cartographie, l'optique, la mécanique, les machines hydrauliques, à vapeur ou à air chaud, les automates et les arts militaires. Le *Pneumatica* contient bon nombre d'anticipations étonnantes d'inventions modernes. Entre autres choses, il décrit plusieurs régulateurs à flotteurs, beaucoup plus sophistiqués que celui de Ktesibios. Dans un de ces dispositifs, appelé « fontaine à vin », la soupape n'était plus reliée directement au flotteur, ce qui permettait de séparer l'élément senseur et l'élément régulateur du système par contre-réaction (**figure 3**). Héron d'Alexandrie citait souvent des applications ludiques de ses montages mécaniques, ce qui fait sourire aujourd'hui beaucoup de chercheurs ; il n'en reste pas moins que ce génial inventeur était un scientifique sérieux qui s'attachait avant tout à la description des principes physiques mis en jeu dans ses montages et qui utilisait pour cela des exemples simples, compréhensibles par tous.

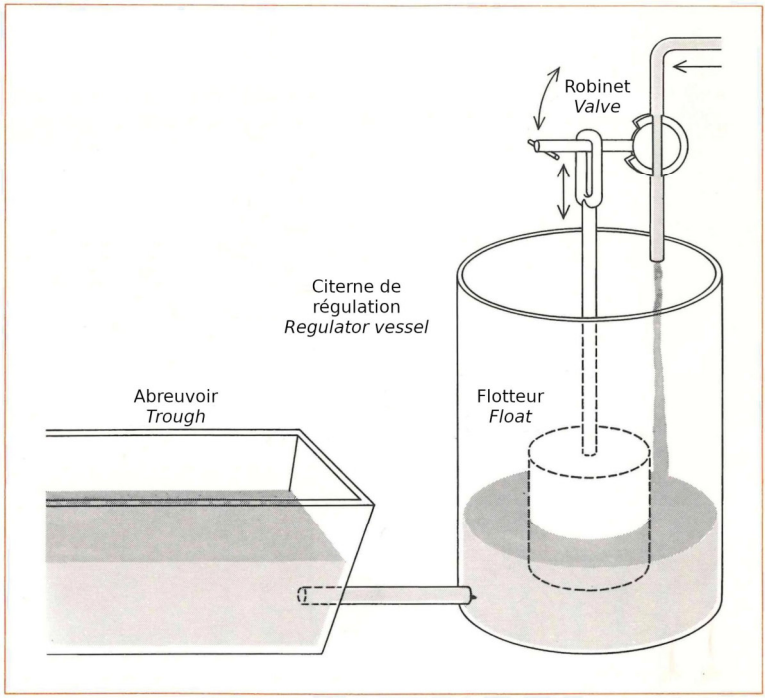



**3. LA FONTAINE À VIN** conçue par Héron d'Alexandrie vers l'an 50 avant J.-C. comportait un régulateur à flotteur qui représentait un progrès par rapport à la soupape de Ktesibios. L'élément de régulation (la soupape) n'était plus directement relié à l'élément senseur (le flotteur). Le niveau entre les vases communicants était ajusté grâce au flotteur placé dans l'un des vases (*à gauche*) qui agissait sur la soupape du réservoir (*au centre*).

## Oubli et redécouverte

Au IX$^{e}$ siècle, soit quelque 800 ans après Héron d'Alexandrie, on voit réapparaître des soupapes flottantes originaires cette fois d'Arabie. Dans un traité intitulé *Kitâb al-Hiyal* (*Sur d'ingénieux mécanismes*), visiblement inspiré du *Pneumatica* d'Héron d'Alexandrie, trois savants arabes de Bagdad, les frères Banû Musâ, décrivent huit systèmes de régulation par rétroaction utilisant des soupapes flottantes. Les auteurs de l'ouvrage étaient des hauts dignitaires de la cour des califes Abbassides. Les dispositifs de régulation qu'ils mentionnaient étaient un peu plus élaborés que les systèmes antérieurs fondés sur le même principe. Dans un de

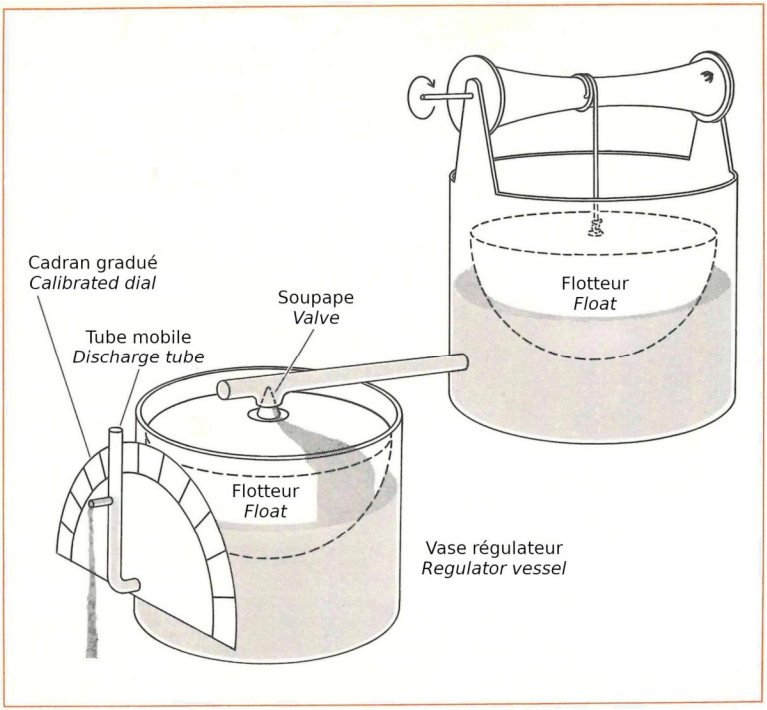
ces dispositifs, le robinet d'arrivée était une vraie vanne de régulation qui remplaçait l'antique clapet maintenu plus ou moins proche de l'extrémité du conduit d'alimentation (**figure 4**).




**4. CE RÉGULATEUR À FLOTTEUR** utilisé pour alimenter un abreuvoir est décrit dans un livre arabe du IX$^{e}$ siècle intitulé *Kitàb al-Hiyal* (*Sur d'ingénieux mécanismes*) dû à trois frères du nom de Banû Musâ, originaires de Bagdad. Le tuyau d'alimentation servant à transporter l'eau d'une rivière voisine vers l'abreuvoir débouchait au-dessus d'une citerne de régulation qui communiquait avec l'abreuvoir. Le flotteur placé dans la citerne agissait sur le robinet d'arrivée placé sur le tuyau d'alimentation.

Les soupapes flottantes ont inspiré certaines des plus audacieuses réalisations de la technologie islamique pré-médiéva-le. Les artisans arabes ont construit des clepsydres monumentales où l'écoulement du temps était ponctué par tout un ensemble de scènes théâtrales mettant en scène des automates. Ces horloges sont décrites en détail dans trois des ouvrages de cette époque qui

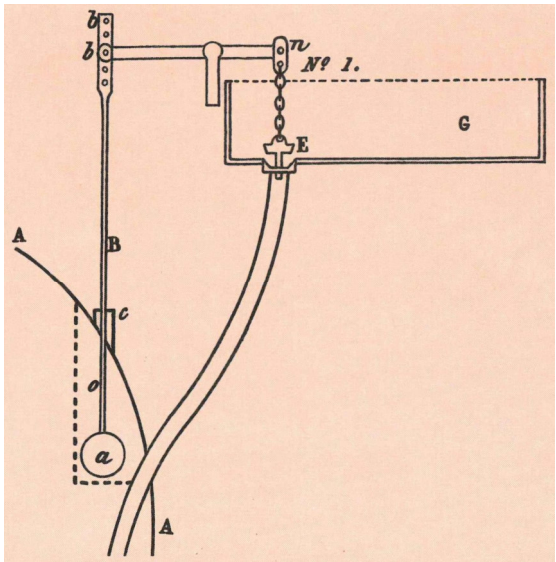
nous sont parvenus et qui traitent des clepsydres. Le premier fut écrit probablement au IXe siècle par un auteur anonyme que les historiens des techniques appellent généralement « Pseudo-Archimède ». Les deux autres livres, inspirés de cette œuvre, sont dus à deux écrivains du XIIIe siècle, Ibn al-Sâ'âtï et al-Jazarî. Les horloges décrites dans ces trois traités utilisent le régulateur à flotteur de Ktesibios pour agir sur le débit de sortie du réservoir principal de la clepsydre et non sur le débit d'alimentation de ce réservoir. Le cours du temps est donc indiqué par une baisse progressive du niveau d'eau et non par une montée (**figure 5**).




**5. CETTE CLEPSYDRE DU XIe SIÈCLE** fut décrite par un auteur islamique connu sous le nom de « Pseudo-Archimède ». Le mécanisme servant à indiquer le temps *(non représenté ici)* était mis en mouvement par la baisse progressive du niveau d'eau dans le réservoir principal. L'entraînement se faisait au moyen d'un câble relié à un flotteur placé dans ce réservoir. Pour obtenir un débit constant à la sortie de ce réservoir, on utilisait une soupape flottante placée dans un vase régulateur. On pouvait régler le

débit d'eau à la sortie de ce second récipient grâce à un tube mobile en forme de *L* qui pivotait autour de sa base. On parvenait ainsi à ajuster la vitesse de descente du flotteur principal en fonction des variations saisonnières de la longueur des heures.

Après ces diverses descriptions datant du XIII[e] siècle, l'utilisation des soupapes flottantes se perd dans les brumes de l'histoire. On ne trouve plus aucune référence concernant l'emploi de ces dispositifs de régulation dans la littérature technique du Moyen Âge, de la Renaissance ou de l'époque classique. En 1575, une traduction latine superbement illustrée du *Pneumatica* d'Héron d'Alexandrie fut publiée. Cet ouvrage, qui eut un grand retentissement et qui exerça une influence décisive sur le développement des techniques, ne contient toutefois aucune indication sur l'emploi des soupapes flottantes comme dispositif de régulation par rétroaction.




**6. LE RÉGULATEUR À FLOTTEUR FUT RÉINVENTÉ** en Angleterre au XVIII[e] siècle, sans que l'on ait connaissance de ses anciennes utilisations. Ce dessin, qui représente un régulateur de niveau d'eau pour les chaudières, provient d'un brevet anglais déposé par Sutton Thomas Wood en 1784. Le niveau d'eau dans la chaudière (*A*) est repéré par un flotteur (*a*) dont les déplacements assurent la régulation de l'alimentation en eau au moyen d'une soupape (*E*).

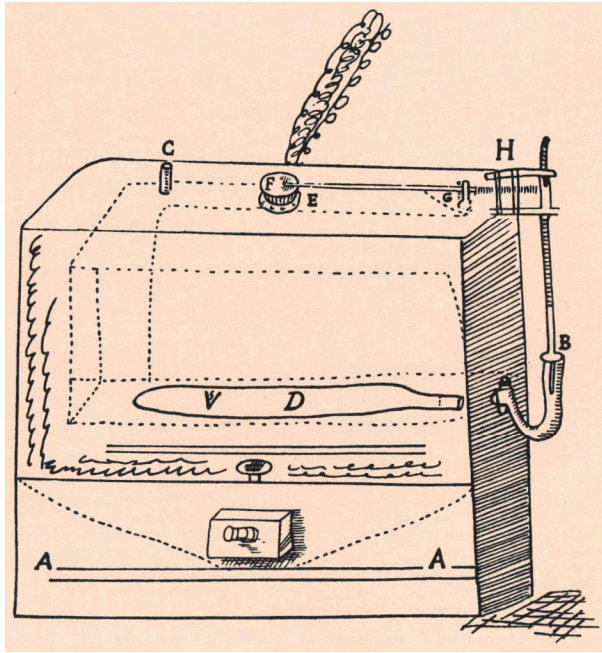
Au milieu du XVIII^e^ siècle, les Anglais réinventent ce dispositif en ignorant totalement ses utilisations antérieures. Les régulateurs à flotteur sont mentionnés pour la première fois dans un ouvrage d'architecture, *The Country Builder's Estimator (Vademecum de l'architecte campagnard),* de William Salmon. Il s'agit alors de dispositifs destinés à contrôler le niveau d'eau dans les citernes des habitations. En 1758, l'architecte britannique James Brindley obtint un brevet pour une machine à vapeur dans laquelle il utilisait une soupape flottante pour ajuster le niveau d'eau à l'intérieur de la chaudière. Quelques années plus tard, I. Polzunov, un des pionniers russes des machines à vapeur, conçut un dispositif analogue qui avait la même fonction. En 1784, l'Anglais Sutton Wood fit breveter une invention similaire, très proche du dispositif d'Héron d'Alexandrie vieux de 13 siècles (**figure 6**). Le régulateur à flotteur se généralisa bientôt comme système d'alimentation en eau des chaudières ; il est encore largement utilisé aujourd'hui dans de nombreuses machines thermiques.

## Le thermostat

Le thermostat n'a pas une histoire aussi ancienne. Le premier thermostat fut inventé au début du XVII^e^ siècle par Cornelis Drebbel, un ingénieur hollandais émigré en Angleterre, qui travaillait à la cour de James I, puis à celle de Charles I. Inventeur plein de talent, Drebbel serait beaucoup plus connu aujourd'hui s'il avait rassemblé dans un ouvrage la description de ses découvertes. D'après un récit de Francis Bacon, Drebbel aurait mis au point ce régulateur de façon fortuite, car à l'origine cet instrument devait servir à réaliser des expériences d'alchimie. Drebbel croyait que pour obtenir la transmutation des métaux en or, il suffisait de stabiliser la température du processus alchimique pendant un temps suffisamment long.

L'appareil de Drebbel n'était en fait d'une enceinte fermée ayant à sa base un petit foyer au-dessus duquel était disposé un compartiment intérieur rempli d'air ou d'alccol et relié à un tube en *U* fermé par un bouchon de mercure (**figure 7**). Au fur et à mesure que la température augmentait, l'accroissement de la pression dans le compartiment intérieur, (l'accroissement de pression résultait de la dilatation de l'air ou à la vaporisation de l'alcool) provoquait la remontée du mercure dans le tube en *U.* Ce dernier faisait bouger une tige qui servait à fermer le volet de cheminée et à réduire le

tirage du four. Inversement, si la température dans l'enceinte devenait inférieure à la valeur désirée, le mercure descendait dans le tube, ouvrant ainsi la cheminée et activant le feu.

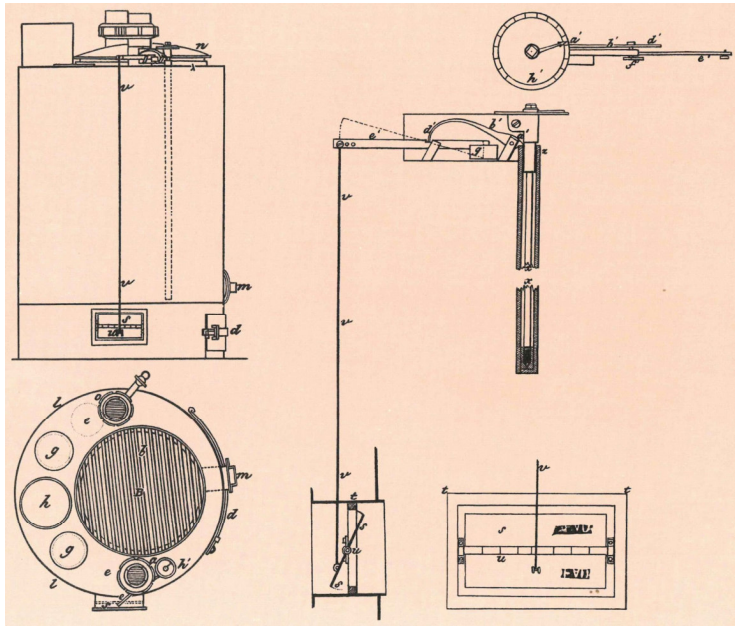



**7. LE THERMOSTAT** fut inventé au début du XVII[e] siècle par Cornelis Drebbel. Ce dessin, dû au petit-fils de Drebbel, montre un dispositif utilisé comme régulateur de température dans un incubateur. La fumée et l'air chaud qui s'élèvent au-dessus du foyer (*A*-*A*) passent autour de l'enceinte d'incubation *(en pointillés)* et s'échappent par une cheminée (*E*). Un vase en verre (*D*) contenant de l'alcool est placé dans l'eau coincée entre la double paroi de l'incubateur. Ce vase est fermé par un bouchon de mercure contenu dans un tube en U (*à droite*). Quand la température augmente, la dilatation des vapeurs d'alcool pousse le bouchon de mercure et le flotteur (*B*). Ce dernier, qui est solidaire d'une liaison (*H*), articulée autour du point (*G*), actionne la fermeture du volet de tirage (*F*) placé sur la cheminée.

Drebbel n'utilisa pas seulement son système pour des expériences de transmutation sur des métaux en fusion, mais aussi pour maintenir une température constante dans des incubateurs. Son régulateur thermique aurait même obtenu un succès d'estime ;

des membres de la Société Royale de Londres, parmi lesquels Robert Boyle, Christopher Wren et Robert Hooke, s'y intéressèrent. On trouve des descriptions détaillées de ce dispositif dans un livre sur les techniques de laboratoire dû au petit-fils de Drebbel (le manuscrit de cet ouvrage est conservé à la bibliothèque de l'Université de Cambridge) et dans le journal intime d'un Français passionné de sciences, Balthasar de Monconys qui étudia les fours thermostatés de Drebbel. Un siècle plus tard, on retrouve, en France, en Allemagne et aux États-Unis, des descriptions de fours analogues, inspirés bien évidemment par celui de Drebbel, mais aucun de ces textes ne le cite. René-Antoine Ferchault de Réaumur, qui transforma un de ces fours en incubateur pour provoquer l'éclosion artificielle des œufs de poule, attribuait la paternité de l'invention à un membre de la famille royale, le Prince de Conti.

Hormis ces quelques applications anecdotiques, les idées de Drebbel sur la régulation de la température par rétroaction furent presque ignorées pendant deux siècles ; puis, brusquement, elles intéressèrent l'ensemble des ingénieurs. Un inventeur parisien nommé Bonnemain est à l'origine de ce brusque revirement. En 1783, Bonnemain, probablement inspiré par la réussite de l'incubateur artificiel de Réaumur, construisit un « régulateur de feu » et déposa un brevet. Il utilisa avec succès ce dispositif dans un incubateur autorégulé, installé dans un grand élevage qui fournissait la cour de Versailles et plusieurs marchés parisiens. L'appareil de Bonnemain était bien supérieur à ses prédécesseurs : il possédait un capteur de température composé de deux tiges en métal (un barreau de fer encastré dans un tube de plomb) et plusieurs autres perfectionnements (**figure 8**). Bonnemain refusa pendant longtemps de publier les détails de son invention. En 1824, alors qu'il avait plus de 80 ans, la Société Française pour l'Encouragement de l'Industrie obtint enfin de lui un plan détaillé de son système de régulation de température. Les principaux journaux techniques anglais et allemands publièrent rapidement des traductions de ce mémoire et le régulateur de température de Bonnemain prit vite place dans les encyclopédies techniques. L'auteur de l'une d'elles, le chimiste écossais Andrew Ure, créa le mot « thermostat » dans son *Dictionary of Arts, Manufactures and Mines*, publié en 1839, où figurait le régulateur de Bonnemain et quelques autres dispositifs qu'Ure avait lui-même conçus.

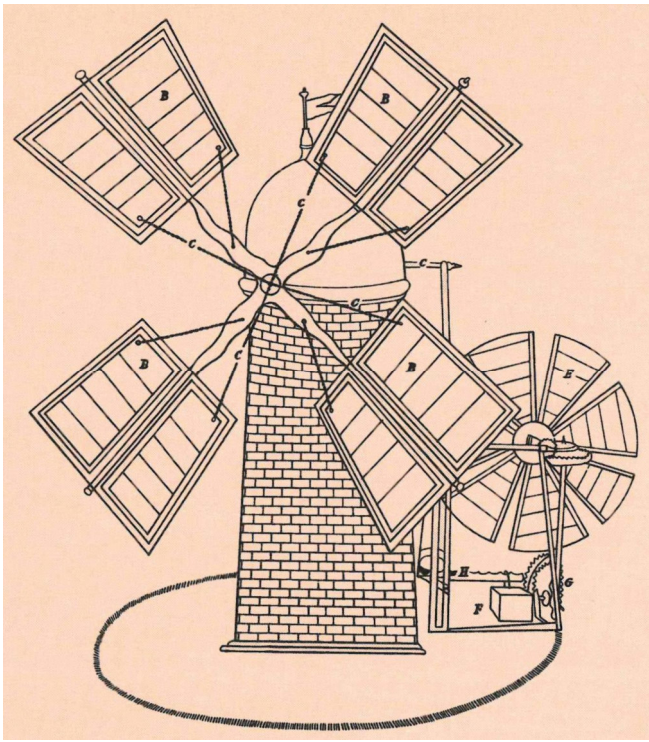


**8. CE THERMOSTAT PERFECTIONNÉ**, utilisé ici sur une chaudière, a été conçu en 1783 par un inventeur parisien nommé Bonnemain. Un capteur de température bi-métallique, constitué par une barre de fer (*x*) entourée d'un tube de plomb (*z*), est immergé dans l'eau de la chaudière. Les déplacements de l'extrémité supérieure du tube en plomb, causés par la dilatation thermique, étaient amplifiés grâce à un jeu de leviers (*b'* et *e'*) reliés à une tringle (*v*). Cette tringle servait à régler la position du volet de tirage (*s*) placé à la sortie du foyer. Quand la température de l'eau dans la chaudière dépassait un certain seuil, que l'on pouvait choisir grâce à un cadran gradué (*h'*), la dilatation du tube en plomb commandait la fermeture du volet de tirage et la mise en veilleuse du feu dans le foyer, sous la chaudière.

## La régulation des moulins à vent

Le troisième grand ancêtre des systèmes à rétroaction est représenté par les mécanismes de régulation automatique des moulins à vent. Ils furent conçus au XVIII^e^ siècle en Angleterre et en Ecosse par des meuniers, des gens pleins de ressources ayant à la fois des talents de bâtisseurs et un début d'attitude scientifique dans l'analyse des problèmes. Plusieurs grands ingénieurs anglais du XVIII^e^ et du XIX^e^ siècles débutèrent leur carrière en édifiant des moulins.

Le brevet du premier dispositif de meunerie utilisant la rétroaction fut déposé en 1745 par Edmund Lee. Il s'agissait d'une sorte de moulinet utilisé pour maintenir le moulin face au vent (**figure 9**).



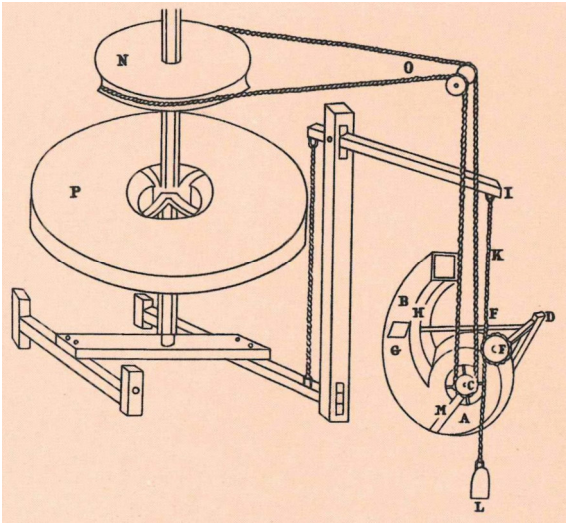

**9. LES PREMIERS SYSTÈMES DE RÉGULATION** des moulins à vent figurent sur un brevet anglais délivré en 1745 à Edmund Lee. Un petit moulinet (*E*), monté sur un axe perpendiculaire à celui de la roue principale, maintenait en permanence les ailes du moulin face au vent. Le moulinet de régulation (*E*) entraînait, par l'intermédiaire d'un jeu d'engrenages (*G*), un bâti mobile (*H*) qui pouvait se déplacer autour du moulin. Quand le vent changeait de direction, les ailes du moulinet se mettaient à tourner, entraînant le déplacement du bâti mobile et la rotation de l'axe de la grande roue qui venait à nouveau se placer face au vent. Chaque aile principale (*B*) du moulin était divisée en deux volets articulés autour d'un axe longitudinal. Ces volets étaient reliés par des chaînes (*c*) à un contre-poids (*F*) qui les tirait vers l'avant, modifiant ainsi l'angle d'attaque au vent.

Ce moulinet était monté perpendiculairement à la roue principale du moulin. Il était fixé sur l'arrière d'un bâti mobile qui servait à positionner la grande roue du moulin par rapport au vent. Grâce à un jeu d'engrenages, le moulinet commandait les déplacements du bâti mobile : dès que les ailes du moulinet se mettaient à tourner, le bâti se déplaçait autour du moulin. Quand la roue principale du moulin était située parfaitement face au vent, le moulinet qui lui était perpendiculaire se trouvait alors dans un plan parallèle à la direction du vent et ses ailes ne bougeaient plus. Chaque fois que le vent tournait, les ailes du moulinet se mettaient à bouger, entraînant avec elles le bâti mobile qui ramenait la roue principale dans une position perpendiculaire au vent. En résumé, ce système forme une boucle de commande fermée qui maintient les ailes du moulin dans une position optimale par rapport à la direction du vent. Placé dans des conditions normales d'utilisation (conditions marquées par de fréquentes et soudaines sautes de vent), l'ensemble moulinet plus bâti mobile représente un servo-mécanisme rudimentaire.

Le moulin à vent conçu par Lee contenait également un mécanisme destiné à réguler la vitesse de rotation des meules du moulin en dépit des variations de la vitesse du vent. Cet ajustement de la vitesse était nécessaire pour éviter que les meules se brisent sous l'action de contraintes excessives et pour fournir une farine d'une finesse constante. Lee résolut ce problème en concevant un système qui permettait aux ailes du moulin de pivoter autour de leur axe, modifiant ainsi leur angle d'attaque. Les ailes étaient reliées à un contrepoids qui les inclinait vers l'avant quand le vent était modéré. Lorsque la vitesse du vent augmentait, la pression aérodynamique exercée sur les ailes devenait plus importante et, au-delà d'une certaine vitesse, elle annulait l'action du contrepoids. Les ailes se redressaient, leur angle d'attaque devenait plus faible et la vitesse de rotation de la roue du moulin diminuait.

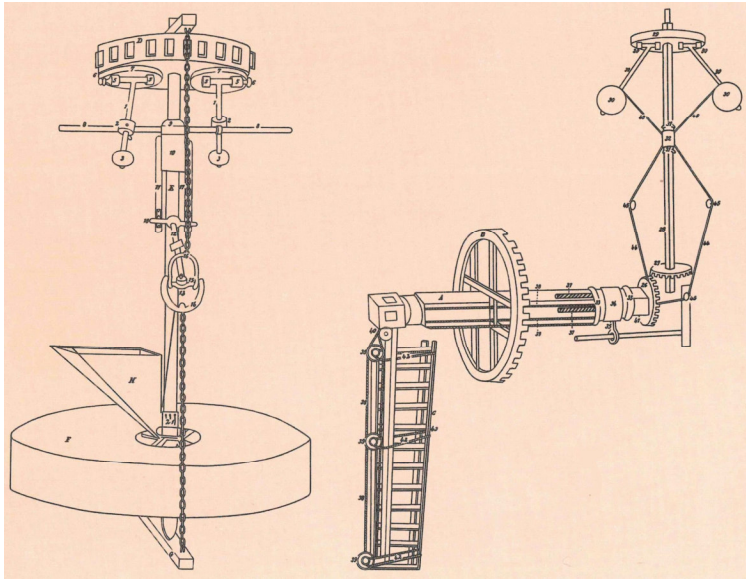
Ce système ne constituait toutefois pas un dispositif de régulation par rétroaction puisque la valeur de la variable régulée (la vitesse de rotation des meules) n'était pas mesurée directement. Pour réaliser une vraie régulation par rétroaction, il fallait trouver une méthode de mesure de cette vitesse ayant une précision suffisante. La découverte du mécanisme baptisé quelquefois « serre-meule » a apporté un moyen de résoudre ce problème de mesure. Ce mécanisme servait à plaquer les meules du moulin pour éviter

qu'elles ne s'écartent quand la vitesse de rotation devenait plus grande. Le mécanisme pressait l'une contre l'autre les meules en pierre avec une force proportionnelle à leur vitesse de rotation (**figure 10**).




**10. LE SERRE-MEULE** est un dispositif de régulation conçu par les meuniers anglais du XVIII[e] siècle pour maintenir les meules l'une contre l'autre quand leur vitesse de rotation augmente. Dans le serre-meule de Robert Hilton, inventé en 1785, la meule principale (*P*) s'abaissait peu à peu, proportionnellement à la vitesse de rotation du moulin. Cette vitesse était mesurée grâce à l'inclinaison d'une ailette mobile (*B*) placée dans une tuyère à la sortie d'une turbine centrifuge (*A*) entraînée par la roue du moulin.

En 1787, Thomas Mead, un meunier anglais, combina l'idée du « serre-meule » et l'utilisation d'un pendule centrifuge pour réaliser un système de régulation de vitesse qui suivait exactement les principes de la rétroaction. Le pendule, entraîné par le mouvement des meules, mesurait leur vitesse de rotation et, grâce à un ensemble de liaisons mécaniques appropriées, modifiait la prise au vent des ailes du moulin, de manière à ajuster la vitesse de la roue en fonction de la valeur optimale nécessaire pour obtenir une farine de bonne qualité (**figure 11**).



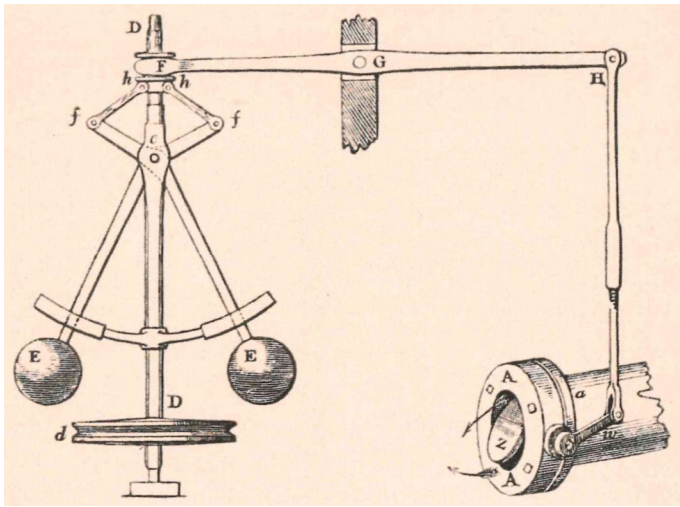
**11. LES PENDULES CENTRIFUGES** furent employées comme dispositif de régulation à rétroaction par le meunier anglais Thomas Mead dans un brevet datant de 1787. La vitesse de rotation des meules était mesurée par un ensemble de pendules centrifuges qui commandaient le mécanisme du serre-meule (*à gauche*). Un second ensemble de pendules centrifuge assurait la régulation de la vitesse de rotation de la roue du moulin, en modifiant la surface des ailes (*à droite*) et leur prise au vent. Les pendules centrifuges des meuniers sont à l'origine du régulateur de Watt.

# Le régulateur à boules

En 1787, l'idée du pendule centrifuge fut également reprise par deux pionniers des machines à vapeur : Matthew Boulton et James Watt. Depuis trois ans, ils travaillaient à la construction de la première machine à vapeur à double effet qui devait remplacer les animaux servant à actionner les meules du célèbre Moulin d'Albion à Londres. Toutefois le système de régulation de cette machine soulevait des problèmes totalement nouveaux, d'autant qu'il n'y avait aucun moyen d'y adapter les dispositifs existants à l'époque.

Watt et Boulton engagèrent John Rennie, alors âgé de 23 ans, pour diriger la mise en route de la machine du Moulin d'Albion. Rennie (qui devint plus tard l'un des plus grands constructeurs de ponts en Grande-Bretagne) venait juste d'achever son

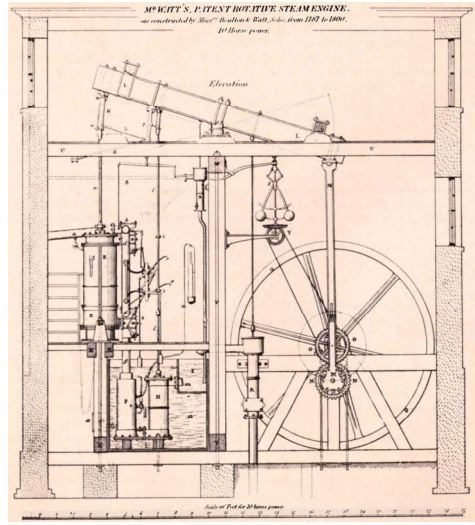
apprentissage chez le célèbre meunier écossais Andrew Meikle. Durant une visite au Moulin d'Albion, en mai 1787, Boulton remarqua l'installation d'un nouveau « serre-meule » dû probablement à Rennie. Boulton envoya aussitôt à Watt une description aussi détaillée qu'enthousiaste du dispositif. L'idée arrivait à point nommé. En novembre, Watt avait imaginé un « régulateur de vitesse centrifuge » et, vers la fin de l'année, le premier régulateur à boules fut installé sur une machine à vapeur. Le dessin du régulateur de Watt allait devenir l'un des plus célèbres dans toute l'histoire des techniques (**figure 12**).




**12. LE RÉGULATEUR À BOULES** (*à gauche*) fut installé en 1790 sur les premières machines à vapeur rotatives construites par James Watt et Matthew Boulton. Ce régulateur était directement inspiré des pendules centrifuges utilisés dans les moulins. Quand la vitesse de rotation de la machine augmentait, les boules (*E*) s'écartaient de l'axe (*D*). Grâce à un jeu de leviers, la déformation du parallélogramme (*fhcf*) commandait l'ouverture de la vanne papillon *z*. La vapeur pouvait alors s'échapper, provoquant une chute de pression dans le cylindre moteur ; il en résultait une diminution de la vitesse de rotation et, par conséquent, la fermeture de la vanne papillon.

*« Je vends ici, monsieur, ce que tout le monde désire posséder : la PUISSANCE. »*

Matthew Boulton, 1776.




Watt ne prit pas de brevet pour son régulateur. Il considérait que ce dispositif n'était qu'une simple adaptation du pendule centrifuge des meuniers. Pour se protéger de leurs concurrents, Boulton et Watt tentèrent de dissimuler l'existence du dispositif ; ils demandèrent à leurs premiers clients de mettre le régulateur hors de la vue du public ; néanmoins, le mystère fut bientôt percé. Quelques années après son invention, le régulateur à boules devint le symbole même de la machine à vapeur. En tournant théâtralement au sommet de chaque machine, il démontrait la puissance d'action de la régulation par rétroaction, d'une manière à la fois plus large et plus convaincante qu'une quelconque description orale ou écrite. Le régulateur à boules fit bientôt son entrée dans les livres et les traités de mécanique et de nombreux inventeurs commencèrent à développer des systèmes à rétroaction applicables dans d'autres domaines des techniques.

## Conclusion

Il est étrange de constater que tous les dispositifs à rétroaction qui furent inventés au début de la Révolution industrielle sont d'origine anglaise. Même les chercheurs qui n'étaient pas nés en Angleterre, notamment Drebbel et Denis Papin (qui mit au point la soupape de sécurité, un système à rétroaction rudimentaire), présentèrent dans ce pays des prototypes de leurs inventions en ordre de marche. Pourquoi le reste de l'Europe était-il si en retard ? Pourquoi par exemple, les inventeurs et ingénieurs du continent ignoraient-ils la soupape flottante qui figurait dans les traductions du *Pneumatica* d'Héron d'Alexandrie, ouvrage pourtant très répandu dès 1575 ? Pourquoi ont-ils attendu que ce dispositif soit redécouvert en Angleterre, deux siècles plus tard, pour commencer à s'y intéresser enfin ?

Selon toute vraisemblance, du XVI^e^ au XVIII^e^ siècle, les scientifiques des pays d'Europe continentale rejetèrent la régulation par rétroaction parce qu'ils s'intéressaient à un autre type de régulation de conception différente, fondé sur un programme de correction strict et prédéterminé. Dans le domaine des techniques, cela transparaît nettement au travers des nombreuses recherches sur les automates, les horloges monumentales, les boîtes à musique et les planétariums entraînés par de savants mécanismes d'horlogerie. Cette fascination des Européens pour les machines programmées et pour l'aspect à la fois immuable et inéluctable de leurs actions se retrouve aussi dans leur attitude face à l'État (monarchie absolue) et leur système économique (mercantilisme).

En Angleterre, au contraire, des esprits éclairés commencèrent à étudier, dès le début du XVIII^e^ siècle, un concept différent de régulation dans lequel le système était réellement autonome grâce à un ensemble de mécanismes internes qui maintenaient son équilibre et sa viabilité. Dans le domaine des techniques, une telle démarche devait conduire à la création de dispositifs de régulation par rétroaction ; dans le domaine économique, au système de libre-échange d'Adam Smith et dans le domaine politique, à la séparation des pouvoirs et au gouvernement constitutionnel.

**Otto Mayr** (1930-2025)
est un ingénieur mécanicien allemand, historien des technologies et ancien directeur du National Museum of History and Technology à Washington DC et du Deutsches Museum à Munich.

Il est particulièrement connu pour ses travaux sur
*Les origines de la régulation par rétroaction* (1969)
et *L'autorité, la liberté et les machines automatiques au début de l'Europe moderne* (1986)
[ouvrages non traduits en français].

Otto Mayr, "The Origins of Feedback Control",
*Scientific American*, vol. 223, n°4, octobre 1970.
https://sniadecky.wordpress.com/2026/05/24/mayro-feedback-en/

Traduction française publiée dans le recueil
*Histoires de machines*,
éd. Belin, bibliothèque "Pour la science", 1980.
https://sniadecky.wordpress.com/2026/05/24/mayro-retroaction-fr/

Smithsonian Institution Archives, Record Unit 371, Box 02, Folder: July 1978, Image No. 78-7490-35

**Otto Mayr**
(2 novembre 1930 – 10 février 2025)

Otto Mayr,
« La régulation des machines par rétroaction »
[*Scientific American*, octobre 1970],
*Histoires de machines*,
éd. Belin, bibliothèque “Pour la science”, 1980.

Texte disponible sur le blog :

**Et vous n’avez encore rien vu…**

*Critique de la technoscience et du scientisme*

http://sniadecky.wordpress.com/

Selon toute vraisemblance, du XVI$^{e}$ au XVIII$^{e}$ siècle, les scientifiques des pays d'Europe continentale rejetèrent la régulation par rétroaction parce qu'ils s'intéressaient à un autre type de régulation de conception différente, fondé sur un programme de correction strict et prédéterminé.

Cette fascination des Européens pour les machines programmées et pour l'aspect à la fois immuable et inéluctable de leurs actions se retrouve aussi dans leur attitude face à l'État (monarchie absolue) et leur système économique (mercantilisme).

**Prix Libre**